

Обработка металлов давлением. Технологии и машины обработки давлением Metal forming. Technology and equipment of metal forming

Научная статья
УДК 621.774.35
DOI: 10.14529/met230202

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ ТОВАРНЫХ ТРУБ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ МАРОК СТАЛИ НА АГРЕГАТАХ С НЕПРЕРЫВНЫМИ СТАНАМИ С КОНТРОЛИРУЕМО-ПЕРЕМЕЩАЕМОЙ ОПРАВКОЙ

А.В. Красиков^{1, 2}, KrasikovAV@vtz.ru

¹ АО «Волжский трубный завод», Волжский, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Увеличение спроса на бесшовные трубы из коррозионностойких марок стали аустенитного класса способствует непрерывному совершенствованию трубопрокатных технологий. В статье представлены результаты комплексного исследования и разработки технологии прокатки товарных длинномерных труб из непрерывно-литой заготовки (НЛЗ) нержавеющей марок стали аустенитного класса на ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой. Для определения пластических и прочностных свойств нержавеющей марок стали в линии ТПА использованы данные результатов экспериментов на комплексе Gleeble 3800 «ЮУрГУ». В исследовании использованы результаты компьютерного моделирования в программном комплексе QForm 3D, а также результаты физического моделирования на современных лабораторных станах винтовой и продольной прокатки. Разработана технология подготовки НЛЗ из нержавеющей марок стали, позволяющая полностью устранить все недостатки литой структуры металла. Наличие рифления на поверхности рабочего конуса оправки полностью решило проблему низкой стойкости оправок при прошивке нержавеющей марок стали. Разработанная и внедренная в промышленное производство на АО «Волжский трубный завод» (АО «ВТЗ») технология прокатки НЛЗ марок стали 08-12X18H10T позволяет получать длинномерные трубы специального назначения высокого качества внутренней и наружной поверхности с требуемым набором эксплуатационных свойств. Актуальность темы заключается в необходимости импортозамещения труб специального назначения из труднодеформируемых марок стали, которые в РФ ранее закупались только за рубежом.

Ключевые слова: сталь, аустенитный класс, непрерывно-литая заготовка, компьютерное моделирование, трубопрокатный агрегат, бесшовная труба, Волжский трубный завод, прошивка, оправка

Для цитирования: Красиков А.В. Основы технологии прокатки товарных труб специального назначения из труднодеформируемых марок стали на агрегатах с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2023. Т. 23, № 2. С. 14–22. DOI: 10.14529/met230202

BASICS OF THE TECHNOLOGY OF ROLLING COMMERCIAL PIPES OF SPECIAL PURPOSE FROM HARD TO DEFORM STEEL GRADES ON UNITS WITH CONTINUOUS MILLS WITH A CONTROLLED-MOVABLE MANDREL

A.V. Krasikov^{1, 2}, KrasikovAV@vtz.ru

¹ JSC "Volzhsky Pipe Plant", Volzhsky, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The increase in demand for seamless pipes made of corrosion-resistant austenitic steel grades contributes to the continuous improvement of pipe rolling technologies. The article presents the results of a comprehensive study and development of a technology for rolling commercial long pipes from a continuously cast billet (CCB) of austenitic stainless steel grades on an injection molding machine with a continuous mill with a controlled-movable mandrel. To determine the plastic and strength properties of stainless steel grades in the injection molding line, data from the results of experiments on the Gleeble 3800 complex of SUSU were used. The study used the results of computer simulation in the QForm 3D software package, as well as the results of physical simulation on modern laboratory screw and longitudinal rolling mills. A technology has been developed for the preparation of CWs from stainless steel grades, which makes it possible to completely eliminate all the shortcomings of the cast metal structure. The presence of corrugation on the surface of the working cone of the mandrel completely solved the problem of low resistance of mandrels when piercing stainless steels. Developed and introduced into industrial production at JSC Volzhsky Pipe Plant (JSC VTZ), the technology for rolling CW of steel grades 08-12X18H10T makes it possible to obtain long-length special-purpose pipes of high quality of the inner and outer surface with the required set of operational properties. The relevance of the topic lies in the need to import substitution of special-purpose pipes made of hard-to-deform steel grades, which were previously purchased in the Russian Federation only abroad.

Keywords: steel, austenitic grade, continuously cast billet, computer modeling, tube-rolling plant, seamless pipe, Volzhsky Pipe Plant, piercing, mandrel

For citation: Krasikov A.V. Basics of the technology of rolling commercial pipes of special purpose from hard to deform steel grades on units with continuous mills with a controlled-movable mandrel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2023;23(2):14–22. (In Russ.) DOI: 10.14529/met230202

Одной из главных задач, стоящих перед трубной промышленностью РФ, является необходимость импортозамещения труб специального назначения из труднодеформируемых марок стали, которые в РФ ранее закупались только за рубежом. При этом для обеспечения конкурентного преимущества при освоении новых видов труб необходимо сокращать производственные издержки при одновременном обеспечении высокого качества. Ярким примером такого импортозамещения является освоение на АО «ВТЗ» технологии прокатки обсадных труб из нержавеющей марки стали, в том числе группы 13Cr. Данный вид труб активно применяется для освоения месторождений углеводородов, имеющих высокую температуру при добыче и транспортировке, содержащих высокие концентрации коррозионно-активных компонентов, таких как CO₂, H₂S, ионы хлора. Подобные агрессивные ус-

ловия эксплуатации трубной продукции вызывают интенсивную коррозию углеродистых марок стали, получивших наибольшее распространение при производстве труб нефтяного сортамента.

Изначально трубопрокатные агрегаты (ТПА) с непрерывными станами были предназначены для прокатки продукции из углеродистых, легированных и высоколегированных марок стали. Однако растущие эксплуатационные требования на сложных месторождениях нефти и газа ставят перед отечественными трубопрокатчиками новые задачи по изготовлению высокотехнологичных труб специального назначения из труднодеформируемых марок стали, изготовление которых ранее считалось возможным только прессованием [1–3].

При раскатке гильзы в непрерывных станах с двух- и трехвалковыми клетями на кон-

тролируемо-перемещаемой оправке, за исключением зазора между валками, напряженное состояние деформируемого металла описывается схемой всестороннего сжатия. Данная схема обеспечивает благоприятное напряженно-деформированное состояние, а значит, возможность раскатки не только углеродистых и легированных марок стали, но теоретически и труднодеформируемых [4].

Использование НЛЗ для производства бесшовных труб долго сдерживалось наличием характерных дефектов (ликваций и несплошностей в центральной части и на поверхности заготовки, трещин и т. д.), что не обеспечивало получение качественных труб. Однако высокая экономическая эффективность использования НЛЗ стимулировала проведение работ по развитию и совершенствованию технологии их производства, разработку и создание новых процессов, технологий и трубопрокатного оборудования, обеспечивающих получение труб высокого качества [5–12]. В электросталеплавильном цехе АО «ВТЗ» в 2019 г. успешно освоено производство непрерывно-литых заготовок из нержавеющей марки стали типа 08-12X18H10T.

Для определения пластических и прочностных свойств марки стали 08-12X18H10T были проведены опыты на растяжение, кручение и осадку с использованием испытательного комплекса Gleeble 3800. По разработанным методикам построены диаграммы пла-

стичности и параметрическое уравнение σ_s . Кроме того, проведено исследование трансформации свойств нержавеющей марки стали 08X18H10T в линии ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой от гильзы до термообработанной трубы (рис. 1).

С использованием программного комплекса QForm 3D проведено компьютерное моделирование процесса прошивки как полый непрерывно-литой, так и сплошной ковальной заготовки из стали 08-12X18H10T. По результатам моделирования процесса прошивки для последующей раскатки установлено, что показатель ресурса пластичности для сплошной заготовки незначительно выше, чем для полый заготовки (средние значения). Однако на переднем торце сплошной заготовки в осевой зоне показатель исчерпания ресурса пластичности больше в 2,7 раза, чем для переднего торца полый заготовки. На рис. 2 представлено распределение максимального значения исчерпания ресурса пластичности по длине сплошной и полый заготовки. Таким образом, сделан вывод, что для прокатки труб из стали 08-12X18H10T необходимо использовать полую непрерывно-литую заготовку.

Проведенный анализ свойств заготовок из марок стали 08-12X18H10T позволяет определить технологическую схему их подготовки к прокатке, этапы которой представлены на рис. 3.

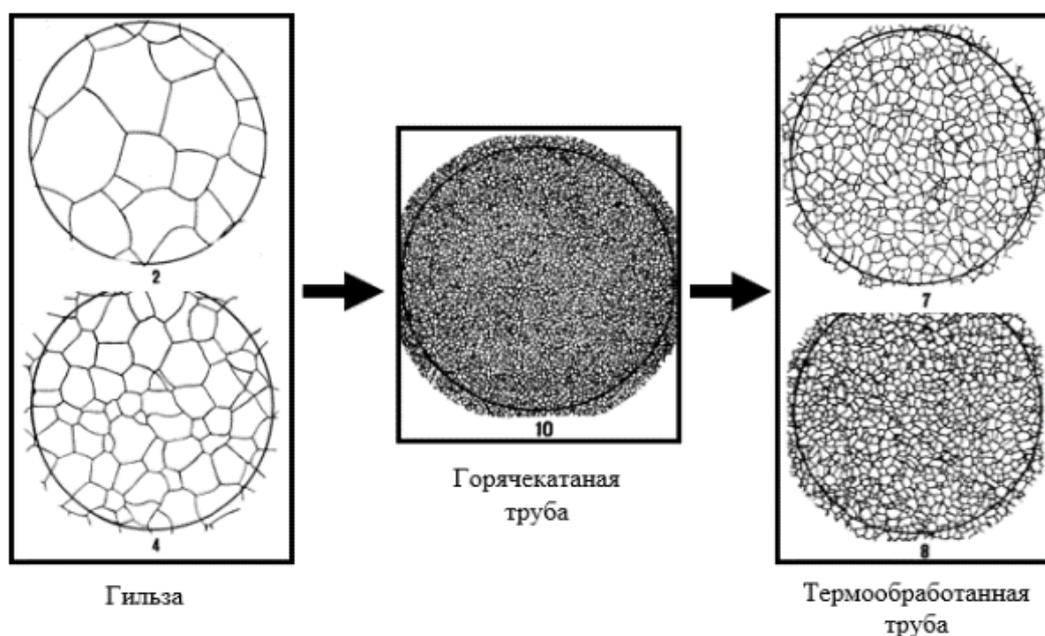


Рис. 1. Размер зерен аустенита от гильзы до термообработанной трубы
Fig. 1. Austenite grain size from sleeve to heat treated pipe

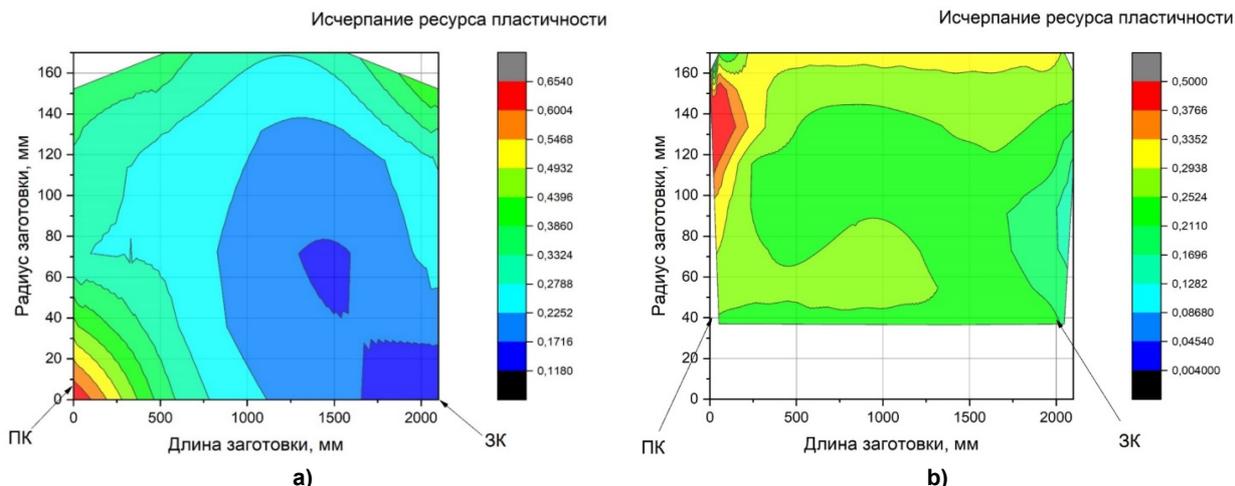


Рис. 2. Изменение истощения ресурса пластичности для сплошной (а) и полой (б) заготовки по ее длине (ПК – передний конец; ЗК – задний конец)

Fig. 2. Change in the plasticity resource depletion for a solid (a) and hollow (b) billet along its length (ПК – front end; ЗК – rear end)

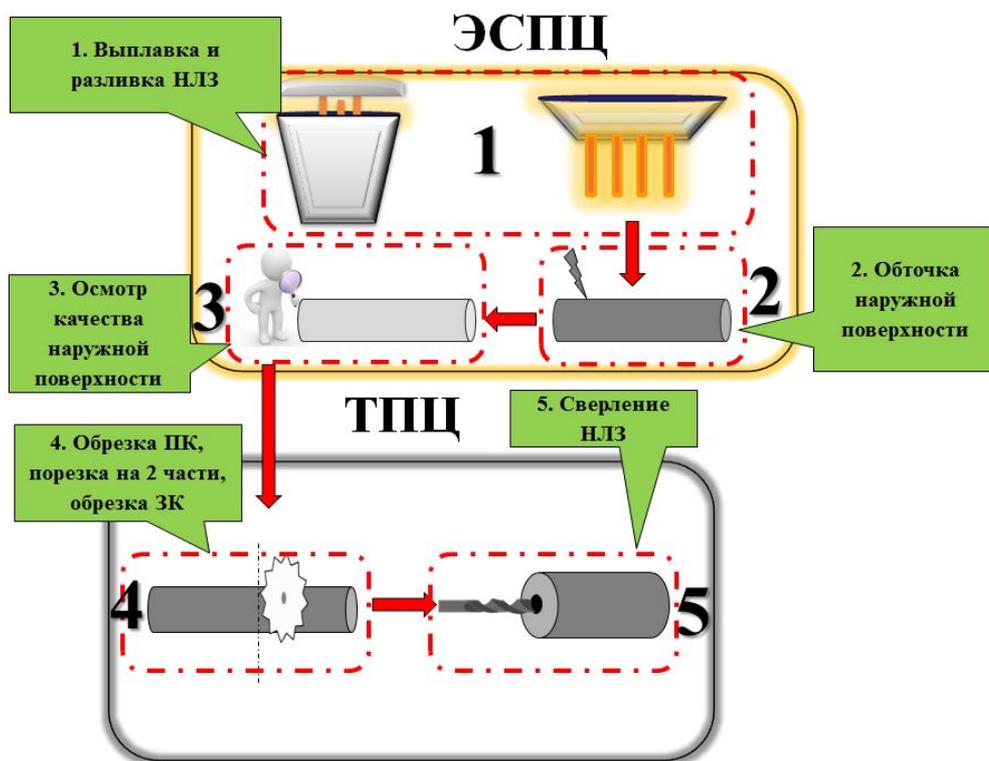


Рис. 3. Технологическая схема подготовки к прокатке заготовок из марок стали 08-12X18N10T
Fig. 3. Technological scheme of preparation for rolling of blanks from steel grades 08-12X18N10T

Обточка наружной поверхности непрерывно-литой заготовки из марок стали 08-12X18N10T призвана убрать несовершенства сталеплавильного происхождения. Для этого применяются специальные станки, позволяющие осуществлять срез металла по 5 мм на сторону (максимальная глубина залегания дефектов сталеплавильного происхождения). Осмотр поверхности обточенной заготовки на

предмет наличия дефектов сталеплавильного происхождения ведется специалистами отдела технического контроля. В случае наличия таких дефектов как исключение назначается дополнительный срез металла для их полного устранения. Операция порезки позволяет получить гладкие торцы заготовки требуемой косины реза, а также нужный по заказу раскрой металла. Операция сверления убирает

осевую рыхлость металла, тем самым обеспечивая качество внутренней поверхности труб без дефектов [13].

На рис. 4 представлено изображение темплета заготовки диаметром 340 мм и схема ее подготовки. Замеры показали, что диаметр осевой несплошности составляет 40 мм со смещением ~ 10 мм от геометрического центра. Данное обстоятельство необходимо учитывать при выборе диаметра сверла, чтобы обеспечить полное удаление осевой рыхлости (центральная пористость и осевые трещины) литого металла без смещения внутреннего отверстия относительно геометрического центра заготовки. Проведенные исследования [14] показывают, что точное положение центровочного отверстия и, соответственно, внутреннего отверстия заготовки непосредственно

влияет на точность размеров получаемых гильз. Для исключения нанесения дефектов от острой кромки на прошивную оправку по переднему концу заготовки между ее торцом и внутренним отверстием делается скругление.

Кроме компьютерного моделирования процесса прошивки также было проведено компьютерное моделирование раскатки гильзы из марки стали 08X18H10T в черновую трубу. Общий вид модели клетей непрерывного стана представлен на рис. 5. Полученные результаты дали возможность рекомендовать рациональные температурно-скоростные параметры для дальнейшей опытной прокатки.

В рамках подготовки к опытно-промышленной прокатке на ТПА 159-426 было проведено физическое моделирование процессов на

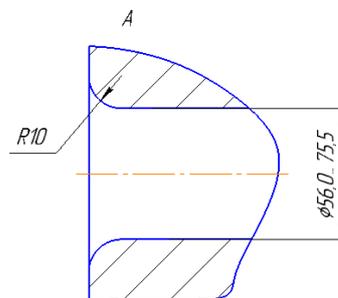
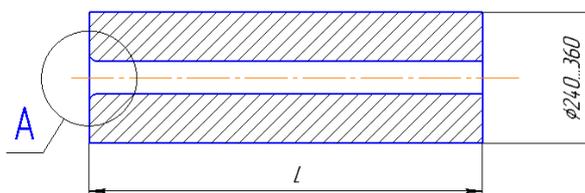


Рис. 4. Темплет и схема подготовленной заготовки
Fig. 4. Template and diagram of the prepared workpiece

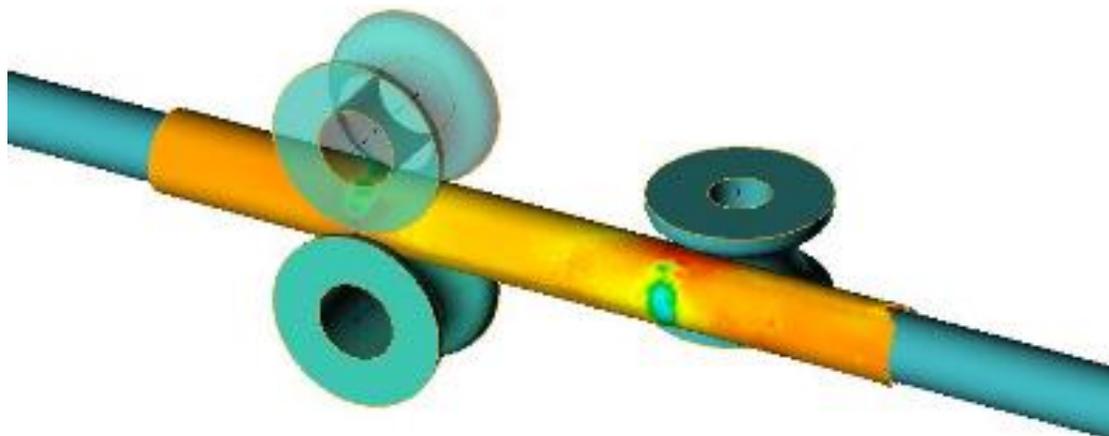


Рис. 5. Общий вид модели клетей непрерывного стана
Fig. 5. General view of the continuous mill stand model

лабораторных станах винтовой прокатки НИТУ «МИСИС» и продольной прокатки АО «РусНИТИ». Полученные результаты с учетом выводов этапа компьютерного моделирования позволили сформулировать окончательные рекомендации по режимам прокатки в промышленных условиях АО «ВТЗ». Общий вид лабораторных станов НИТУ «МИСИС» винтовой и АО «РусНИТИ» продольной прокатки для физического моделирования процессов прошивки и раскатки представлен на рис. 6.

В рамках решения задачи повышения стойкости прошивных оправок при прокатке труб из нержавеющей марки стали было предложено испытать оправки с особой обра-

боткой поверхности рабочего конуса – создание рифления (рис. 7).

Наличие рифления на поверхности рабочего конуса оправки позволило также достичь существенный прирост стойкости в 20 раз (с 3 до 60 проходов) без существенного изменения стоимости инструмента [15, 16].

Опытная прокатка труб 325×16 мм из стали 08X18H10T в условиях ТПА 159-426 АО «ВТЗ» выявила технологическую проблему, связанную с извлечением оправки непрерывного стана при раскатке гильзы в черновую трубу. Для решения указанной проблемы была предложена специальная калибровка непрерывного стана. Благодаря большей ширине и увеличенным выпускам



Рис. 6. Лабораторные станы МИСИС винтовой (а) и РусНИТИ продольной (б) прокатки для физического моделирования процессов прошивки и раскатки
Fig. 6. MISiS laboratory mills for screw (a) and RusNITI longitudinal (b) rolling for physical modeling of piercing and rolling processes

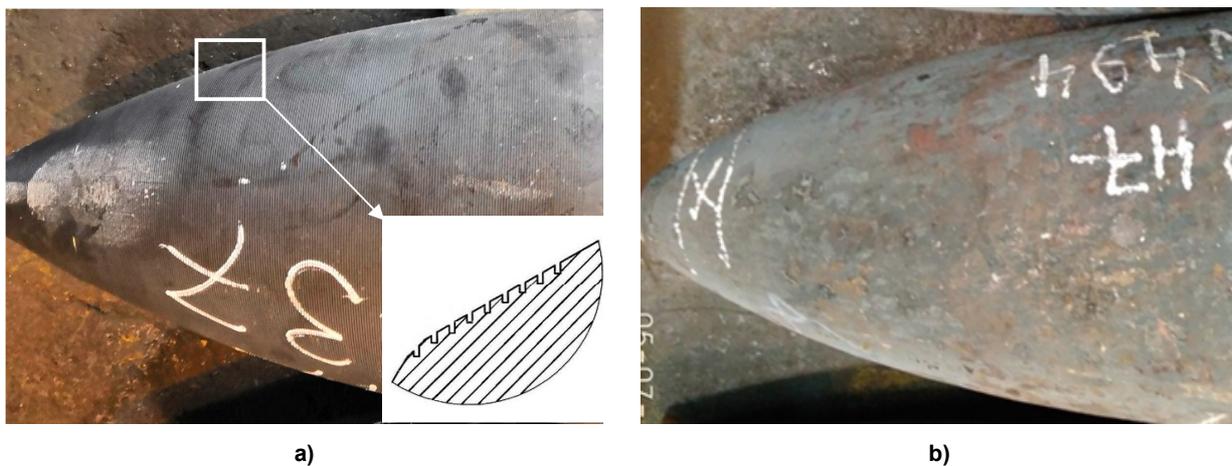


Рис. 7. Внешний вид рабочей поверхности новой оправки: а) с рифлением на рабочей поверхности; б) без рифления
Fig. 7. External view of the working surface of the new mandrel: a) with corrugation on the working surface; b) without corrugation

калибра извлечение оправки непрерывного стана в момент раскатки осуществляется при штатных нагрузках на рейку. На разработанную и внедренную новую сквозную технологию прокатки товарных труб из марок стали аустенитного класса получен патент РФ [17].

В рамках работы исследованы свойства применяемых смазочных и дезоксидирующих материалов. Даны практические рекомендации к применению дезоксидантов и графитовых смазок. Проведен анализ влияния данных материалов на качество готовых труб.

Принципиальными отличиями технологии раскатки труб из нержавеющей марки стали аустенитного класса являются: меньшая скорость прокатки, большие зазоры, а также гильза с более тонкой стенкой.

Выводы

Новая технология прокатки внедрена в промышленное производство на АО «ВТЗ» в условиях ТПА 159-426 с непрерывным станом и позволяет осуществлять прокатку длинномерных труб специального назначения из нержавеющей марок стали аустенитного класса с высоким качеством внутренней и наружной поверхности [3, 4, 17]. В период 2018–2022 гг. в ТПЦ-3 АО «ВТЗ» прокатано и отгружено потребителям свыше 4000 т труб из марок стали группы 13Cr и свыше 300 т труб из марки стали 08X18H10T. Импортозамещение, расширение сортамента и локализация производства горячекатаных труб из труднодеформируемых марок стали обеспечивает стратегическую безопасность нефтяной и атомной промышленности РФ.

Список литературы

1. Прессование стальных труб и профилей / Г.И. Гуляев, А.Е. Притоманов, О.П. Дробич, В.К. Верховод. М.: Металлургия, 1973. 192 с.
2. Освоение производства бесшовных труб из нержавеющей стали мартенситного класса марки типа 13Cr на ТПА 159-426 АО ВТЗ / Н.В. Трутнев, А.В. Красиков, А.Г. Ульянов и др. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 12. С. 68–71. DOI: 10.32339/0135-5910-2018-12-68-71
3. Освоение технологии прокатки труб из нержавеющей стали / Н.В. Трутнев, А.В. Выдрин, М.В. Бунышин и др. // Сталь. 2021. № 2. С. 35–38.
4. Красиков А.В. Исследование процесса раскатки труб на агрегатах с непрерывными станами с целью повышения износостойкости оправок: автореф. ... канд. техн. наук. М., 2015. 25 с.
5. Минаев А.А., Захур М., Коновалов Ю.В. Специфика использования катаной и непрерывнолитой заготовки для производства труб // Производство проката. 2005. № 4. С. 29–37.
6. Цикл докладов фирмы Маннесманн Демаг Меер для симпозиума по изготовлению и окончательной обработке бесшовных труб. Т.1: Новые технологии изготовления труб фирмы Маннесманн Меер. М., 1981. 62 с.
7. Повышение качества трубной заготовки за рубежом / Ю.А. Дубровская, А.Е. Сочнев, Л.Н. Скоробогатская и др. // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». М., 1981. Вып. 5. С. 23–45.
8. Непрерывнолитые круглые заготовки / В.Я. Генкин, А.Т. Есаулов, М.И. Староселецкий и др. М.: Металлургия, 1984. 143 с.
9. Повышение качества трубной заготовки для горячедеформированных бесшовных труб / Г.Г. Шепель, П.П. Навыко, О.А. Симоненко и др. // Сталь. 2002. № 8. С. 84–85.
10. Напряженное состояние и качество непрерывного слитка / В.М. Мирсалимов, В.А. Емельянов. М.: Металлургия, 1990. 151 с.
11. Корн Р. Заготовки для производства бесшовных труб // Производство труб. М.: Металлургия, 1980. С. 95–103.
12. Непрерывнолитые трубные заготовки из легированной стали / П.Н. Ткачев, Ю.Е. Кан, Е.П. Мавтевосян и др. // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». М., 1987. Вып. 16. С. 49–51.
13. Красиков А.В. Технология подготовки непрерывно-литой заготовки из нержавеющей марок стали к прокатке на ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2021. Т. 21, № 3. С. 40–48. DOI: 10.14529/met210305
14. Влияние центровочного отверстия на переднем торце заготовки на качество гильзы / А.А. Корсаков, А.В. Король, Д.В. Михалкин и др. // Производство проката. 2017. № 10. С. 44–48.

15. Повышение стойкости оправок прошивного стана при производстве бесшовных труб из нержавеющей стали мартенситного класса марки типа 13Cr в линии ТПА 159-426 АО ВТЗ / И.И. Лубе, Н.В. Трутнев, С.В. Тумашев и др. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76, № 12. С. 1259–1264.
16. Extending the life of piercing plugs / I.I. Lube, A.V. Krasikov, A.V. Vydrin, A.A. Korsakov // Steel Times International. 2021. Vol. 45, no. 2. P. 33–35.
17. Пат. 2788284 Российская Федерация, МПК В21В 19/04. Способ производства бесшовных горячедеформированных коррозионно-стойких труб из стали аустенитного класса / Д.А. Пумпянский, С.Г. Четвериков, А.В. Красиков [и др.]. № 2022105681; опубл. 17.01.23.

References

1. Gulyaev G.I., Pritomanov A.E., Drobich O.P., Verkhovod V.K. *Pressovanie stal'nykh trub i profiley* [Pressing of steel pipes and profiles]. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1973. 192 p. (In Russ.)
2. Trutnev N.V., Krasikov A.V., Ul'yanov A.G., Lube I.I., Kosmatskii Ya.I., Korsakov A.A. Mastering of seamless pipes production from martensitic class stainless steel of 13Cr grade type at the JSC "VTZ" TPA 159–426 pipe mill. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*. 2018;12:68–71. (In Russ.) DOI: 10.32339/0135-5910-2018-12-68-71
3. Trutnev N.V., Bunyashin M.V., Krasikov A.V., Ul'yanov A.G., Vydrin A.V., Chernykh I.N., Zvonarev D.Y. Technological development of the rolling of stainless steel pipes. *Steel in Translation*. 2021;51(2):131–134. DOI: 10.3103/S0967091221020108
4. Krasikov A.V. *Issledovanie protsessa raskatki trub na agregatakh s nepreryvnymi stanami s tsel'yu povysheniya iznosostoykosti opravok: avtoref. kand. tekhn. nauk* [Investigation of the process of pipe rolling on units with continuous mills in order to increase the wear resistance of mandrels. Abstract of cand. sci. diss.]. Moscow; 2015. 25 p. (In Russ.)
5. Minaev A.A., Zakhur M., Konovalov Yu.V. [The specifics of the use of rolled and continuously cast billets for the production of pipes]. *Rolling*. 2005;4:29–37. (In Russ.)
6. *Tsikl dokladov firmy Mannesmann Demag Meer dlya simpoziuma po izgotovleniyu i okonchitel'noy obrabotke besshovnykh trub. T.1: Novye tekhnologii izgotovleniya trub firmy Mannesmann Meer* [Series of reports by Mannesmann Demag Meer for a symposium on the production and finishing of seamless pipes. Vol. 1: New technologies for the manufacture of pipes manufactured by Mannesmann Meer]. Moscow; 1981. 62 p. (In Russ.)
7. Dubrovskaya Yu.A., Sochnev A.E., Skorobogatskaya L.N. et al. [Improving the quality of pipe blanks abroad]. *Ferrous metallurgy. Bulletin of the institute "Chermetinformatsiya"*. Moscow; 1981;5:23–45. (In Russ.)
8. Genkin V.Ya., Esaulov A.T., Staroseletsky M.I. et al. *Nepreryvnolitye kruglye zagotovki* [Continuously cast round blanks]. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1984. 143 p. (In Russ.)
9. Shepel G.G., Navnyko P.P., Simonenko O.A. et al. [Improving the quality of pipe blanks for hot-deformed seamless pipes]. *Steel*. 2002;8:84–85. (In Russ.)
10. Mirsalimov V.M., Emelyanov V.A. *Napryazhennoe sostoyanie i kachestvo nepreryvnogo slitka* [Stress state and quality of a continuous ingot]. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1990. 151 p. (In Russ.)
11. Korn R. [Blanks for the production of seamless pipes]. In: *Production of pipes*. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1980. P. 95–103. (In Russ.)
12. Tkachev P.N., Kahn Yu.E., Mavtevosyan E.P. et al. [Continuously cast pipe blanks from alloyed steel]. *Ferrous metallurgy. Bulletin of the institute "Chermetinformatsiya"*. Moscow; 1987;16:49–51. (In Russ.)
13. Krasikov A.V. Technology of Preparation of a Continuous cast Billet from Stainless Steels for Rolling on a Pipe Rolling Unit with a Continuous Mill with Controlled-Moving Beading. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2021;21(3):40–48. (In Russ.) DOI: 10.14529/met210305
14. Korsakov A.A., Korol A.V., Mikhalkin D.V., Alyutina E.V., Khramkov E.V., Niklyayev A.V., Ulyanov A.G., Blagoveshchensky S.I. [Influence of the centering hole at the front end of the workpiece on the quality of the sleeve]. *Rolling*. 2017;10:44–48. (In Russ.)
15. Lube I.I., Trutnev N.V., Tumashev S.V., Krasikov A.V., Ul'yanov A.G., Korsakov A.A., Kosmatskii Ya.I. Increase of resistance of piercing mill mandrels at seamless pipes production of

13Cr grade martensite class stainless steel at line ТПА 159-426 of JSC VTZ. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2020;76(12):1259–1264. (In Russ.) DOI: 10.32339/0135-5910-2020-12-1259-1264

16. Lube I.I., Krasikov A.V., Vydrin A.V., Korsakov A.A. Extending the life of piercing plugs. *Steel Times International*. 2021;45(2):33–35.

17. Pumpyanskiy D.A., Chetverikov S.G., Krasikov A.V. et al. *Sposob proizvodstva besshovnykh goryachedeformirovannykh korrozionno-stoykikh trub iz stali austenitnogo klassa* [Method for the production of seamless hot-formed corrosion-resistant pipes from austenitic steel]. Patent RF, no. 2788284, 2023. (In Russ.)

Информация об авторе

Красиков Андрей Владимирович, канд. техн. наук, главный прокатчик, АО «Волжский трубный завод», Волжский, Россия; докторант, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; KrasikovAV@vtz.ru.

Information about the author

Andrey V. Krasikov, Cand. Sci. (Eng.), Chief roller, JSC “Volzhsky Pipe Plant”, Volzhsky, Russia; Doctoral student, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; KrasikovAV@vtz.ru.

Статья поступила в редакцию 28.02.2023

The article was submitted 28.02.2023